

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Вятский государственный университет»
(ВятГУ)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Вятский государственный
университет», кандидат
сельскохозяйственных наук, доцент
С.Г. Литвинец



« 17 » октября 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Вятский государственный университет»

Диссертация «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок» выполнена на базе Института математики и информационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ВятГУ) на кафедре инженерной физики.

В период подготовки диссертации соискатель Заграй Ираида Александровна работала на кафедре инженерной физики ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» в должности доцента, а затем старшего научного сотрудника.

В 2007 году окончила ФГБОУ ВПО «Вятский государственный гуманитарный университет» по специальности «Физика с дополнительной специальностью (информатика)». С 2007 по 2011 гг. обучалась в аспирантуре ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника», а в 2012 г. защитила кандидатскую диссертацию по указанной специальности. С 2013 по 2016 гг. прошла обучение в докторантуре ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Научный консультант – Кузьмин Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

По итогам обсуждения диссертации Заграй Ираиды Александровны «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок» принято следующее **заключение:**

Сжигание природных и искусственных топлив в энергоустановках различных областей промышленности связано с повышением температуры рабочих сред, и соответственно, с увеличением роли лучистого теплообмена по сравнению с другими способами передачи тепла. Определение характеристик излучения продуктов горения и сгорания является необходимым в решении проблем экологии, теплотехники, военной техники и научных исследованиях, связанных с проектированием, разработкой и эксплуатацией энергетических установок. Одним из критериев оценки совершенства рабочих процессов и эффективности энергетических установок в целом является уровень температуры рабочих сред.

Использование современных оптических приборов (пирометров, тепловизоров) для точного бесконтактного определения температуры и температурных полей факела при сжигании ископаемых топлив (торфа и угля) подразумевает корректную установку спектральной или интегральной излучательной способности исследуемой среды с учетом длины волны (или

спектрального интервала) приемника излучения выбранного устройства. Отсутствие литературных и справочных данных по излучательным способностям многофазных и многокомпонентных рабочих сред (газовых смесей с твердыми и жидкими дисперсными частицами сложного химического состава) в широком интервале длин волн и температурном диапазоне требует проведения всего комплекса расчетных многофакторных исследований характеристик теплового излучения. Поэтому, в работе решается актуальная проблема математического моделирования процессов теплового излучения гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания на основе методологии комплексного исследования. Она сочетает экспериментальные и расчетные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, размеров частиц (дисперсности), радиационных характеристик газовой фазы и частиц конденсированной фазы сложного химического состава, а также характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Разработан универсальный модульный программный комплекс «Spektr» для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К. Комплекс отличается от существующих тем, что обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. Комплекс имеет двойное назначение (военное и гражданское), позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

2) Получены результаты расчетных исследований характеристик излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ,

газогенератор, паровой котел) с учетом селективности и влияния определяющих факторов (температуры, давления, дисперсности, состава газовой и конденсированной фаз, наличия сажи и др.) на спектры теплового излучения.

3) Разработана научно-обоснованная методика пирометрирования топки парового котла, основу которой представляет новый подход экспериментально-расчетного определения излучательной способности, устанавливаемой на яркостных пирометрах. Методика отличается от существующих тем, что позволяет определять отдельно температуру газовой фазы в полосе излучения CO_2 и температуру частиц конденсированной фазы в полосе прозрачности газовой фазы на основе анализа спектров излучения рабочих сред энергетических установок. Доказано существование и найдена величина температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

4) Разработан программно-аппаратный комплекс, основанный на применении созданной программы «Temper» (получено свидетельство на программу ЭВМ) и пирометра Optris CTlaser F2H для полосы излучения CO_2 , который позволяет определять температуру и излучательную способность топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива (торфа и угля). Комплекс отличается от существующих тем, что его работа основана на нахождении общего решения аналитических экспериментальных и расчетных зависимостей излучательной способности от температуры при заданной массовой доле CO_2 .

5) Получены расчетные спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

Теоретическая и практическая значимость, ценность научных работ соискателя

Теоретическая значимость работы заключается в том, что с помощью созданного универсального модульного программного комплекса доказана ярко-выраженная селективность излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании различных топлив, которую необходимо учитывать при выборе оптических приборов для бесконтактного измерения температуры. Установленные области наибольшего и наименьшего влияния различных факторов на радиационные характеристики и характеристики излучения необходимы в моделировании радиационного теплообмена, при планировании, прогнозировании и интерпретации результатов физических, математических экспериментов и теплотехнических расчетов для энергоустановок (ЖРД, РДТТ, газогенераторы, паровые котлы), рабочие среды которых представляют собой гомогенные и гетерогенные продукты горения и сгорания.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что исследование направлено на повышение надежности и экологичности работающих установок промышленной теплоэнергетики. При полном отсутствии в литературе информации по спектральной излучательной способности многофазных и многокомпонентных рабочих сред применение методологии комплексного исследования характеристик излучения указанных сред открывает новые возможности для использования оптических приборов (пирометров, тепловизоров) с наивысшей достоверностью и эффективностью в системах контроля за температурным режимом работы энергетических установок. Полученные расчетные характеристики излучения рабочих сред факела при сжигании твердых топлив (торфа и угля) необходимы для определения теплонапряженности, проведения пирометрического контроля и оценки шлакования экранных поверхностей и уровня образования оксидов азота. Созданные основы методологии научного исследования характеристик излучения продуктов

сгорания ракетных двигателей необходимы для разработки электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов, для наведения на них зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела, для защиты летательных аппаратов ложными тепловыми целями, а также для проведения тепловых расчетов при отработке конструкций и диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей.

Ценность научных работ соискателя подтверждается имеющимися актами внедрения от крупнейшей российской торфодобывающей компании ЗАО «ВяткаТорф», Кировского филиала ПАО «Т Плюс» (Кировская ТЭЦ-4), Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН. Результаты исследования по оценке влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на атмосферу Земли опубликованы на сайте Ria.ru медиагруппы «Россия сегодня». Материалы диссертации применяются в образовательной деятельности ВятГУ по направлению подготовки 13.03.01. Теплоэнергетика и теплотехника.

Работа выполнена в лаборатории теплофизических исследований кафедры инженерной физики ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» в рамках НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-5 в 2012 г., НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-11 в 2014 г. Некоторые результаты работы получены в результате выполнения регионального гранта РФФИ 15-48-02482\15 в 2015 г., гранта РФФИ 16-07-01145 «а» в 2016-2018 гг. Тематика работы была поддержана Фондом содействия инновациям по программе «УМНИК» в 2020 г. Исследование проведено в рамках программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации состоит в том, что Заграй И.А. принимала непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, создании баз данных по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц рабочих

сред энергетических установок на основании литературных и собственных экспериментальных результатов, разработке модульного программного комплекса, апробации результатов исследования, применении методологии для установления влияния различных факторов на характеристики излучения рабочих сред энергетических установок, разработке стратегии определения температуры и интерпретации экспериментальных результатов пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, формулировке выводов и подготовке публикаций по теме работы.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы обеспечивается использованием фундаментальных законов теплового излучения, теплофизики, теплотехники, оптики, химии горения, современных методов и методик определения и обработки исходных данных, методов расчета радиационных характеристик дисперсных сред с помощью теории рассеяния, метода сферических гармоник в РЗ-приближении для решения интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды, метода бесконтактного пирометрического измерения температуры, современного поверенного оборудования и систем обработки результатов физического эксперимента.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертации опубликовано 65 работ, включая 15 статей в журналах, входящих в базы данных Scopus и WoS, 8 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 1 монография, 1 свидетельство на программу ЭВМ, а также 40 работ в других научных журналах, изданиях и сборниках материалов конференций.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Заграй, И.А. Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплоэнергетика. 2023. №1. С. 66–74 (WoS, Scopus).

2. Заграй, И.А. Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Тепловые процессы в технике. 2023. Т.15. № 3. С.133–137 (ВАК).

3. Заграй, И.А. Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 170–178 (WoS, Scopus).

4. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 1. Исследование характера и уровня излучения для модельных ЖРД и РДТТ / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 3. С. 451–460 (WoS, Scopus).

5. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 2. Исследование влияния различных факторов для РДТТ / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 4. С. 597–607 (WoS, Scopus).

6. Заграй, И.А. Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 2. С. 303–313 (WoS, Scopus).

7. Заграй, И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126–132 (WoS, Scopus).

8. Заграй, И.А. Характеристики теплового излучения факела модельного ракетного двигателя на твердом топливе с учетом скоростной и температурной неравновесностей газа и частиц / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 1. С. 75–84 (WoS, Scopus).

9. Заграй, И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Е.И. Маратканова, И.А. Десятков // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2. С. 301–315 (WoS, Scopus).

10. Заграй, И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 27–33 (ВАК).

11. Zagrai, I.A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012226 (WoS, Scopus).

12. Zagrai, I.A. Modeling of thermal radiation of combustion products in the gas generator / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017), Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. Pages: 1 – 5 (WoS, Scopus).

13. Zagrai, I.A. Simulation of thermal radiation from heterogeneous combustion products of peat burning in power plants / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017), Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. Pages: 1 – 5 (WoS, Scopus).

14. Zagrai, I.A. Modeling of Thermal Radiation of Heterogeneous Combustion Products in the Model Solid Rocket Engine Plume / V.A. Kuzmin, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1801–1807 (WoS, Scopus).

15. Заграй, И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 55–64 (ВАК).

16. Заграй, И.А. Моделирование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в камере сгорания модельного двигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 92–97 (Scopus).

17. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания на срезе сопла ракетного микродвигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 3–9 (Scopus).

18. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя / В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 385–400 (WoS, Scopus).

19. Заграй, И.А. Исследование оптических свойств и дисперсности частиц продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова, Е.И. Маратканова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т.7. № 4. С. 188–192 (ВАК).

20. Заграй, И.А. Комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа в энергетических установках / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т.7. № 10. С. 459–464 (ВАК).

21. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 58–67 (ВАК).

22. Заграй, И.А. Исследование характеристик излучения продуктов сгорания газогенератора / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // Вектор науки ТГУ. 2015. № 4 (34). С. 53–59 (ВАК).

23. Заграй, И.А. Определение размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, А.В. Россохин, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №11-12. С. 3–10 (ВАК).

Монография:

24. Заграй, И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // LAP Lambert Academic Publishing. 2014. 140 с. ISBN: 978-3-659-51152-3.

Свидетельство на программу ЭВМ:

25. Свидетельство РФ № 2021667438 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Temper: № 021667015: В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова, А.Л. Адеков. Заявитель Вятский гос. ун-т. Заявл. 29.10.2021. Оpubл. 29.10.2021.

Работа прошла апробацию на следующих международных и всероссийских конференциях: Национальный конгресс по энергетике (Казань, КГЭУ, 2014 г.) (диплом II степени); Шестая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-6 (Москва, МЭИ, 2014 г.) (диплом I степени); X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2015 г.); XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Звенигород Московской области, НКТМ РАН, 2015 г.) (диплом I степени); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 70-летию основания каф. ракетных двигателей КАИ (Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2015 г.); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, МЭИ, 2017 г.); Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.);

Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», ICIE-2017 (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.); Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-7 (Москва, МЭИ, 2018 г.); 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, МФТИ, 2021 г.); XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Казань, КазНЦ РАН, 2023 г.).

Специальность, которой соответствует диссертация

Представленная диссертация Заграй И.А. соответствует Паспорту научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника», а именно следующим пунктам: 3 – «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; ... перенос ... энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ ...»; 4 – «Процессы переноса ... энергии ... в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах»; 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»; 8 – «Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем».

Диссертация Заграй И.А. является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования.

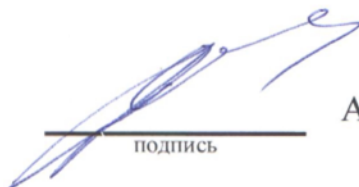
Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Заграй И.А., они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

Диссертация «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок»

Заграй Ираиды Александровны соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры инженерной физики ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», протокол № 2 от 11.10.2023. Присутствовало на заседании 20 человек. Результаты голосования: «за» – 20 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Председатель заседания:
заведующий кафедрой
инженерной физики
ФГБОУ ВО «Вятский
государственный
университет»,
к.физ.-мат.н., доцент



подпись

Алексей Георгиевич Хлебов

Секретарь заседания:
старший лаборант кафедры
инженерной физики
ФГБОУ ВО «Вятский
государственный
университет»



подпись

Ирина Николаевна Толстова



Собственноручную подпись *А.Т. Хлебова,*
И.Н. Толстовой заверяю.
Ведущий специалист по кадрам
Г.В. Вудюков